中国生态农业学报 2017 年 2 月 第 25 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2017, 25(2): 211−220

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160484

李妹娟, 周念, 章家恩, 向慧敏, 梁开明. 不同水稻品种混作养鸭对土壤养分动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 211−220
Li M J, Zhou N, Zhang J E, Xiang H M, Liang K M. Effect of rice varieties mixed-cropping with duck raising on nutrient dynamics in paddy soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 211−220

不同水稻品种混作养鸭对土壤养分动态的影响*

李妹娟[1], 周 念[1], 章家恩[1,2,3]**, 向慧敏[1], 梁开明[4]

(1. 华南农业大学资源环境学院 广州 510642; 2. 广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心 广州 510642; 3. 农业部华南热带农业环境重点开放实验室 广州 510642; 4. 广东省农业科学院水稻研究所 广州 510640)

摘 要: 鸭稻共作和水稻混作均可产生良好的生态效应, 但能否将两项技术结合起来, 即通过不同水稻品种混作与稻田养鸭的叠加, 进而产生“1+1>2”的生态效应和生产效益, 是一项值得加以实践和探讨的课题。为探明多品种水稻混作养鸭这类复合生物多样性利用模式的应用可行性, 本试验设置了水稻单作常规种植(施药施肥)、水稻单作养鸭、水稻单作空白对照(不养鸭不施肥药)、水稻品种混作常规种植(施药施肥)、水稻品种混作养鸭和水稻品种混作空白对照(不养鸭不施肥药)6 种种植模式开展田间试验, 研究不同水稻品种混作养鸭对土壤养分动态和稻米品质的影响。结果表明: 种植双季稻后, 水稻品种混作养鸭处理下土壤有机质含量显著高于其他种植模式。早晚季水稻生长期间水稻品种混作养鸭处理的土壤全氮含量低于水稻品种混作常规种植处理, 但均显著高于其他处理; 水稻品种混作养鸭处理的土壤碱解氮含量较其他处理显著提高。晚稻收获后水稻混作养鸭种植模式的土壤全磷含量显著高于常规种植模式, 混作处理比单作处理平均土壤速效磷含量高。种植双季稻后, 水稻品种混作养鸭种植模式的土壤全钾含量和速效钾含量均高于其他处理。水稻品种混作养鸭处理的稻米出糙率、精米率、直链淀粉含量和胶稠度较其他处理高, 且垩白粒率较其他处理低。综合表明, 水稻品种混作养鸭模式更有利于改善田间土壤养分状况, 提高稻米品质, 故此模式可为优质健康稻米生产提供新途径。

关键词: 鸭稻共作; 水稻品种混作; 土壤养分动态; 稻米品质
中图分类号: S31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)02-0211-10

Effect of rice varieties mixed-cropping with duck raising on nutrient dynamics in paddy soils*

LI Meijuan[1], ZHOU Nian[1], ZHANG Jia'en[1,2,3]**, XIANG Huimin[1], LIANG Kaiming[4]

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Modern Eco-agriculture and Circular Agriculture, Guangzhou 510642, China; 3. Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510642, China; 4. Rice Research Institute of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

* 广东省科技计划项目(2015B090903077, 2016A020210094)、广州市科技计划项目(201604020062)和广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(2016LM1100)资助
** 通讯作者: 章家恩, 主要研究方向为农业生态学、入侵生态学与土壤生态学等方面的研究。E-mail: jeanzh@scau.edu.cn
李妹娟, 主要研究方向为农业生态学与土壤生态学等方面。E-mail: limeijuan028@163.com
收稿日期: 2016-05-28 接受日期: 2016-11-23

* Founded by the Science and Technology Project of Guangdong Province (2015B090903077, 2016A020210094), the Science and Technology Project of Guangzhou (201604020062), and the Innovation Team Construction Project of Modern Agricultural Industry Technology System in Guangdong Province (2016LM1100)
** Corresponding author, E-mail: jeanzh@scau.edu.cn
Received May 28, 2016; accepted Nov. 23, 2016

Abstract: Rice-duck farming system with different varieties of rice mixed-cropping could produce excellent ecological effects. However, it is for now largely unclear whether the synergy of the two farming systems (rice-duck farming and rice varieties mixed-cropping) could improve ecological conditions and production efficiency to have "1+1>2" effect when concurrently implemented. Because of large-scale rice monoculture with high application of chemical pesticides and fertilizers, food and eco-environment security has increasingly worsened. To meet the demands for diverse tastes and high-quality organic rice, and to further explore the feasibility of biodiversity model in different rice varieties mixed-cropping systems and duck-rice co-culture, an innovative double rice vareties mixed-cropping along with duck raising was set up and studied. To test the effects of the farming systems on soil nutrient dynamics and rice quality, six different treatments were set up — including 'Shengbasimiao' rice variety mono-cropping with conventional farming practice (SC), 'Shengbasimiao' rice variety mono-cropping with duck raising (SD), 'Shengbasimiao' rice variety mono-cropping (CK1), mixed-cropping of rice varieties of 'Shengbasimiao' and 'Huajingxian 74' with conventional farming practice (MC), combined rice varieties of 'Shengbasimiao' and 'Huajingxian 74' mixed-cropping and duck raising (MD), and rice varieties of 'Shengbasimiao' and 'Huajingxian 74' mixed-cropping (CK2). After early and late rice planting in the first year, organic matter content of paddy soils under treatment MD was significantly higher than that under the other treatments. Although soil total nitrogen content in early rice planting under treatment MD was significantly lower than that under treatment MC, it was significantly higher than that under other treatments. After early and late rice planting, it was noted that soil alkali-hydrolyzable nitrogen content under treatment MD was significantly increased compared with that under the other treatments. The content of total phosphorus was significantly higher than that under the conventional cropping system after late rice harvest, and the average content of soil available phosphorus under rice varieties mixed-cropping systems was higher than that under rice variety mono-cropping systems. After rice cropping for one year, the contents of soil total potassium and available potassium under treatment MD were higher than those under the other treatments. Rice brown rate, milled rice rate, amylase content and gel consistency under MD were higher than those under the other treatments, the rate of chalky rice under MD was lower than that under the other treatments. In conclusion, the integrated farming system of rice varieties mixed-cropping and duck raising improved soil nutrients and rice grain quality. This study successfully tried a new farming system that can ensure ecological health, and high-quality and high-yield rice production.
Keywords: Integrated rice-duck farming; Rice varieties mixed-cropping; Soil nutrient dynamics; Rice grain quality

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国的主要粮食作物，利用多样性栽培和复合种养来提高水稻单产，改进稻米品质和增加抗性一直是当前该领域的研究热点[1-2]。长期以来，为了追求粮食高产与经济利益，水稻种植大多以单一化和集约化方式进行，少数高产或高经济价值的品种得到大面积推广和栽培，水稻品种多样性和农田生物多样性日趋单调，易导致生态系统平衡的破坏以及病虫害的频发[3-4]。同时，为了防治农业病虫害而大量使用农药，不仅会增加虫害的抗药性，还会带来环境污染以及农产品的农药残留等问题[5]。因此，通过农业物种的间套作或复合种养来增加农田生态系统生物多样性进而控制或减轻病虫害的暴发，最终减少化学农药的投入已成为近年来国内外研究的热点领域[6]。

近十多年来，鸭稻共作已成为中国、日本和东南亚国家或地区广泛推广应用的一项生态农业技术。在我国，许多科研人员围绕鸭稻共作生产的效应、效果及其内在过程、作用机制等方面开展了广泛的应用基础理论与实践研究。大量研究结果表明，鸭稻共作生产对稻田的养分循环[7-8]、病虫草害[9-10]、水体环境[11]、水稻生理生态[12]、温室气体排放[13-14]、稻米品质[15]等方面均具有明显效果。同时，国内外在农作物的间作混种方面也开展了较多的研究与实践。混种(或混作)是指多品种(系)混合种植，即将生育期相近、相关农艺性状相似、抗性基因不同的品种(系)按一定的比例混播混栽[16]。研究表明，混种可增强株型和群体间的补偿性，改善群体的受光状态，充分利用空间和自然资源，最终提高群体产量[17-20]；混种还可通过生物多样性及互补机制，控制和减轻病虫害的发生[21-22]，有效地减少化学药剂使用，降低农药对生态环境的负面影响。韩豪华等[23]将抗草潜力不同的水稻品种进行混合种植，研究了该系统对稗草[*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.]萌发和生长的影响，其试验结果表明抗草性弱的品种与化感抗草性强的品种混合种植，其抗草性能得到提高，稗草可得到一定程度的控制。

由上可见，鸭稻共作和水稻混作均可产生良好的生态效应，因此，能否将两项技术嫁接起来，即

通过品种多样性与物种多样性的叠加(不同水稻品种混作+稻田养鸭), 进而产生“1+1>2”的生态效应和生产效益, 是一项值得加以实践和探讨的课题。因此, 本研究通过大田试验, 将两个不同水稻品种混作同时在稻田养鸭, 研究水稻品种混作、鸭稻共作方式能否通过改变环境因素和稻田土壤养分状况, 从而改善稻米品质, 旨在进一步探明多品种水稻混作养鸭这类复合生物多样性利用模式的应用可行性, 进而提供一种适宜于在田间生产健康安全配方米的生态农业生产新技术。

1　材料与方法

1.1　研究地概况

本研究在广东省广州市增城区华南农业大学增城教学科研基地进行。该基地位于广州市增城区的西南部, 地处低山丘陵区, 属南亚热带季风湿润气候, 光照充足、气候温和、雨量充沛、热量丰富, 年平均气温 21.8 ℃, 年无霜期长达 335~360 d, 年平均降雨量 2 137 mm, 年相对湿度 78%。试验田为赤红壤发育而成的水稻土。

1.2　试验材料

试验选用两个水稻品种: ①‘胜巴丝苗’, 审定编号: 粤审稻 2005002, 早晚兼用型优质籼稻品种, 早稻全生育期约 125 d 左右, 晚稻 109~115 d, 植株稍高, 株高为 106.7~109.8 cm, 产量相对较低, 高抗稻瘟病, 感白叶枯病, 除直链淀粉含量偏低外其他品质良好; ②‘华粳籼 74’, 审定编号: 粤审稻 200002, 早稻全生育期约 130 d, 晚稻约 115 d, 株高约为 100 cm, 为高产品种, 高抗稻瘟病, 高抗白叶枯病, 直链淀粉含量相对其他品种较高。

1.3　试验设计与田间管理

1.3.1　混作品种组合及试验小区

本试验采取田间小区试验, 设空白对照、常规栽培和鸭稻共作 3 种生产方式。每种生产方式下设‘胜巴丝苗’单作处理、‘胜巴丝苗’和‘华粳籼 74’两品种混作处理(将两种水稻种子按 1∶1 比例充分混合均匀后播种育秧并移栽, 以下简称“水稻混作”)两种处理方式, 组合形成 6 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 18 个处理小区, 小区面积为 80 m^2, 各小区采取随机区组布设, 保护行种植水稻品种为‘胜巴丝苗’。各种植方式下分别比较水稻单作养鸭、水稻混作以及两模式套用效果。

1.3.2　田间管理

试验于 2009 年早、晚稻种植, 水稻栽插规格株行距为 28 cm×22 cm。所有小区均在秧苗移栽前施鸡粪(每小区约 50 kg), 早稻和晚稻分别于 3 月 15 日和 7 月 30 日浸种, 育秧 20 d 左右, 分别于 4 月 1 日和 8 月 15 日犁地, 4 月 5 日和 8 月 19 日施基肥耕地、插秧。空白对照处理区与鸭稻共作处理区在水稻整个生育期内不施用化肥、农药和除草剂。水稻常规栽培处理的早稻和晚稻分别于 4 月 12 日和 8 月 28 日施用除草剂(50%草胺乳油), 早稻于 4 月 20 日和 5 月 20 日、晚稻于 9 月 15 日和 10 月 8 日各喷施 1 次农药(50%乐果乳油); 在第 1 次喷药时施入复合肥(芭田牌 1+1 复合肥, 18-8-15), 每小区施肥量为 4.0 kg。鸭稻共作处理区在插秧约 1 周后围网放鸭, 且小区四周用高 50 cm 的尼龙网做成围栏, 以防鸭子外逃, 每小区放雏鸭 3 只, 齐穗期(早稻 6 月 10 日, 晚稻 10 月 18 日)将鸭子收回圈养。鸭稻共作田块在共作期间保持田间水深 6~8 cm, 在鸭子收回圈养后使田间水体落干。所有处理烤田期间在收获前 3 周停止灌水, 其余时间田间保持 3~5 cm 水层。试验田一年两季种植水稻, 每季水稻收获后使稻草秸秆还田, 耙茬备耕。

1.4　测定指标及方法

1.4.1　土壤理化性质的测定

土壤样品采集分别于早、晚稻插秧后 1 周(返青期)和收鸭后 1 周(齐穗期)进行, 共 4 次, 分别于 4 月 20 日、6 月 17 日、9 月 1 日和 10 月 25 日取样。测定指标包括土壤有机质含量、土壤全氮含量、土壤碱解氮含量、土壤全磷含量、土壤速效磷含量、土壤全钾含量、土壤速效钾含量。采样方法为: 使用土钻进行梅花状 5 点取样法, 每个小区中分 5 点取样, 采集表层 15 cm 深的土柱, 每点取样约 0.25 kg, 混合均匀带回实验室, 通风阴干, 除去植物残体和石块、结核, 采用四分法取适量土样使之全部过 18 目筛(供速效养分分析使用)或者 100 目筛(全量养分分析使用)。土壤理化性质分析方法参照鲍士旦的《土壤农化分析》[24]。土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法(稀释热法), 土壤全氮含量测定采用凯氏定氮法, 土壤全磷含量测定采用 $HClO_4$-H_2SO_4 法, 土壤全钾含量测定采用 NaOH 熔融法、火焰光度法, 土壤碱解氮含量测定采用碱解扩散法, 土壤速效磷含量测定采用 0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$ 法, 土壤速效钾含量测定采用 NH_4OAc 浸提的火焰光度法。

1.4.2　稻米品质的测定

收获后稻谷风干储藏 3 个月后用于品质性状的

测定。糙米率、精米率、整精米率、长宽比、垩白粒率的测定参照部颁标准《NY147—88 米质测定方法》(略有修改)。稻米直链淀粉含量和胶稠度用 FOSS-TECATOR 公司生产的近红外谷物分析仪(Infratec1241 grain analyzer)进行测定。

1.5　数据分析

所有试验数据均采用 SPSS 17.0 统计软件进行分析，利用单因素方差分析(ANOVA)判别不同处理之间的土壤化学性质和稻米品质是否存在显著性差异。

2　结果与分析

2.1　水稻混作养鸭对土壤理化性质的影响

2.1.1　对土壤有机质含量的影响

从图 1 可以看出，各处理的土壤有机质含量变化趋势基本一致，即先上升后下降再上升，种植双季稻后土壤有机质总量总体上有所上升。在早稻收获前(6 月 20 日)，水稻混作养鸭处理和水稻单作养鸭处理下土壤有机质含量显著高于其他处理，其中比水稻单作常规种植、水稻混作常规种植和水稻单作空白对照、水稻混作空白对照处理分别高 13.93%、7.45%和 17.35%、15.59%；晚季水稻种植后到收获前(9 月 1 日—10 月 22 日)，水稻混作养鸭处理也显著高于其他种植模式处理，表明水稻混作与鸭稻种植模式套用时可提高土壤有机质含量。

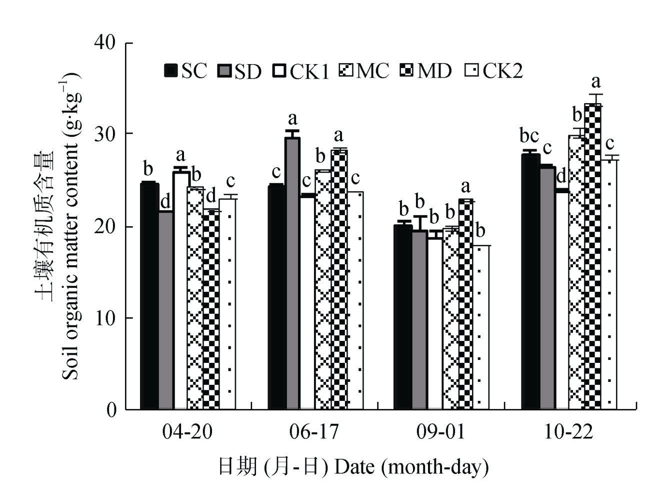


图 1　不同水稻栽培模式下土壤有机质含量的动态变化

Fig. 1　Dynamic change of soil organic matter contents under different farming treatments

SC：水稻同一品种单作常规栽培；SD：水稻同一品种单作养鸭；CK1：水稻同一品种单作空白对照(不施肥不养鸭)；MC：水稻两品种混作常规栽培；MD：水稻两品种混作养鸭；CK2：水稻两品种混作空白对照(不施肥不养鸭)。图中不同处理间的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, LSD 检验)。SC: one rice variety mono-cropping with conventional farming; SD: one rice variety mono-cropping with duck raising farming; CK1: blank control (no fertilization, no duck raising) of one rice variety mono-cropping; MC: two rice varieties mixed cropping with conventional farming; MD: two rice varieties mixed cropping with duck raising; CK2: bland control (no fertilization) of two rice varieties mixed cropping. Different lowercase letters in the figure indicate significant differences ($P < 0.05$ by LSD test).

2.1.2　对土壤全氮和碱解氮含量的影响

不同处理下土壤全氮含量的变化见图 2A，可以看出，早晚稻各处理田间土壤全氮含量基本呈现出先下降后上升的趋势。早季水稻种植后到收获前土壤全氮含量的高低顺序为：水稻混作常规种植处理、水稻单作养鸭处理、水稻单作常规种植处

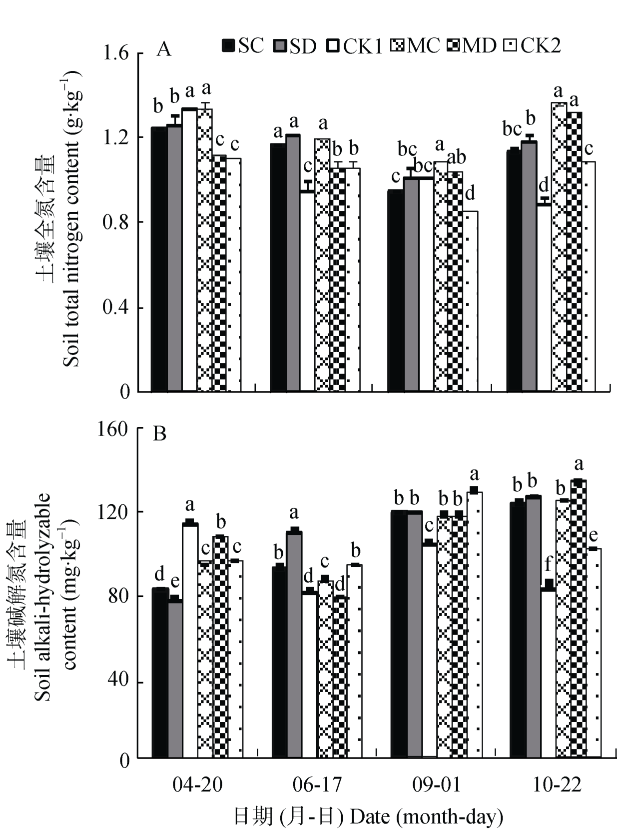


图 2　不同水稻栽培模式下土壤全氮(A)和碱解氮(B)含量的动态变化

Fig. 2　Dynamic changes of soil total nitrogen (A) and alkali-hydrolyzable nitrogen (B) contents under different farming treatments

SC：水稻同一品种单作常规栽培；SD：水稻同一品种单作养鸭；CK1：水稻同一品种单作空白对照(不施肥不养鸭)；MC：水稻两品种混作常规栽培；MD：水稻两品种混作养鸭；CK2：水稻两品种混作空白对照(不施肥不养鸭)。图中不同处理间的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, LSD 检验)。SC: one rice variety mono-cropping with conventional farming; SD: one rice variety mono-cropping with duck raising farming; CK1: blank control (no fertilization, no duck raising) of one rice variety mono-cropping; MC: two rice varieties mixed cropping with conventional farming; MD: two rice varieties mixed cropping with duck raising; CK2: bland control (no fertilization) of two rice varieties mixed cropping. Different lowercase letters in the figure indicate significant differences ($P < 0.05$ by LSD test).

理>水稻混作养鸭处理、水稻混作空白对照处理>水稻单作空白对照。种植双季稻后，水稻混作常规种植和水稻混作养鸭处理之间的土壤全氮含量差异不显著，但二者均显著高于其他处理；且相对空白对照处理而言，水稻混作空白对照处理也显著高于水稻单作空白对照处理，这表明水稻品种混作和养鸭两模式套用时更有助于稳定稻田土壤的全氮含量。

从图 2B 可以看出，水稻单作常规种植、水稻单作养鸭种植模式的土壤碱解氮含量呈持续上升趋势，空白对照种植模式则是先下降后上升再下降的趋势，而鸭稻种植模式则是先下降再上升的趋势。种植两季后，以水稻混作养鸭种植模式处理的土壤碱解氮含量最高；同时，与水稻单作养鸭模式、常规栽培方式、空白种植模式相比较，水稻混作养鸭比水稻单作养鸭处理显著高 5.72%，水稻混作常规种植处理比水稻单作常规种植处理高 1.20%，水稻混作空白对照处理比水稻单作空白对照处理显著高 16.00%。这表明水稻混作种植模式有助于田间土壤碱解氮含量的增加，且与鸭稻模式套用时，其效果则更好。

2.1.3　对土壤全磷含量和速效磷含量的影响

从图 3A 中可以看出，早晚稻各处理田间土壤全磷含量均呈现出先下降后平缓上升的趋势。在早稻种植前期，以水稻单作空白对照处理的田间土壤全磷含量最高，而早稻收获后则以水稻混作空白对照处理的土壤全磷含量最高；晚稻收获后，常规种植模式下土壤全磷含量显著低于其他处理。各处理田间土壤速效磷含量的动态变化(图3B)表现为先上升后下降的变化趋势，早稻收获后，以水稻混作空白对照处理的土壤速效磷含量最高；晚稻收获后，水稻混作空白对照和水稻单作空白对照处理的土壤速效磷含量显著高于其他处理，然而混作模式的土壤速效磷含量的平均值则略高于单作种植模式，这表明水稻混作种植模式在一定程度上有利于维持较高的土壤速效磷含量。

2.1.4　对土壤全钾和速效钾含量的影响

从土壤全钾含量动态变化来看(图 4A)，各处理的变化趋势基本一致，即呈先上升再下降而后趋于稳定变化的趋势。早稻收获后，水稻混作养鸭种植模式的土壤全钾含量高于其他处理；晚稻收获后，土壤全钾含量的变化趋势与早稻的表现趋势基本一

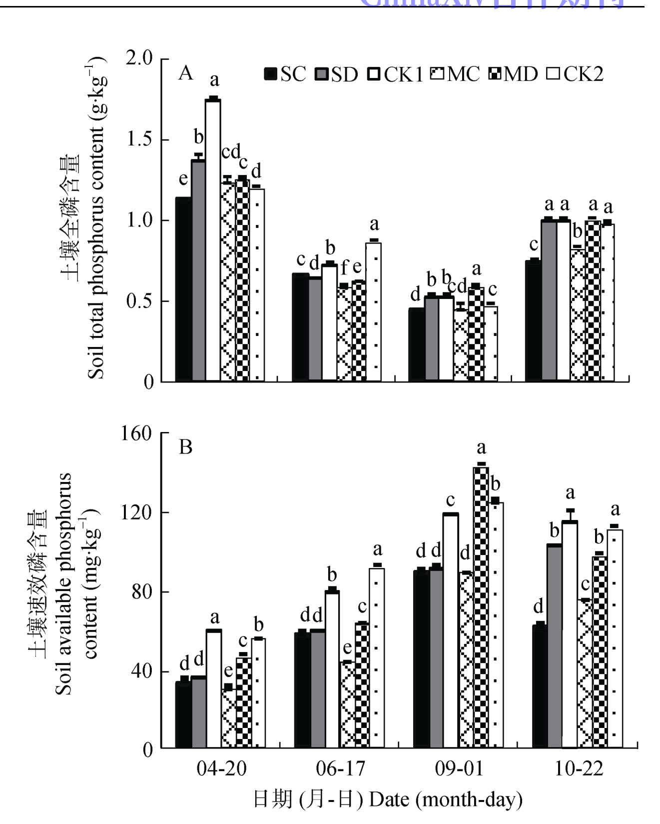


图 3　不同水稻栽培模式下土壤全磷(**A**)和速效磷(**B**)含量的动态变化

Fig. 3　Dynamic changes of soil total phosphorus (A) and available phosphorus (B) contents under different farming treatments

SC: 水稻同一品种单作常规栽培; SD: 水稻同一品种单作养鸭; CK1: 水稻同一品种单作空白对照(不施肥不养鸭); MC: 水稻两品种混作常规栽培; MD: 水稻两品种混作养鸭; CK2: 水稻两品种混作空白对照(不施肥不养鸭)。图中不同处理间的不同小写字母表示差异显著(P<0.05, LSD 检验)。SC: one rice variety mono-cropping with conventional farming; SD: one rice variety mono-cropping with duck raising farming; CK1: blank control (no fertilization, no duck raising) of one rice variety mono-cropping; MC: two rice varieties mixed cropping with conventional farming; MD: two rice varieties mixed cropping with duck raising; CK2: bland control (no fertilization) of two rice varieties mixed cropping. Different lowercase letters in the figure indicate significant differences (P < 0.05 by LSD test).

致，其高低顺序为：水稻混作养鸭处理、水稻混作空白对照处理>水稻单作空白对照处理、水稻单作养鸭处理>水稻混作常规种植处理、水稻单作常规种植处理，且稻鸭共作方式、常规栽培方式、空白种植模式相比较，均以混作种植模式较高，这说明混作更有利于提高稻田土壤全钾含量，促进水稻对钾元素的吸收，为后期的抗倒伏提供了物质基础，且最终提高水稻产量。从图 4B 可以看出，各处理的田间土壤速效钾含量均呈先下降后上升再下降的趋势，且其升降幅度基本一致(晚稻水稻单作常规种植处理除外)。早稻种植时，水稻单作空白对照处理的田间土壤速效钾含量显著高于其

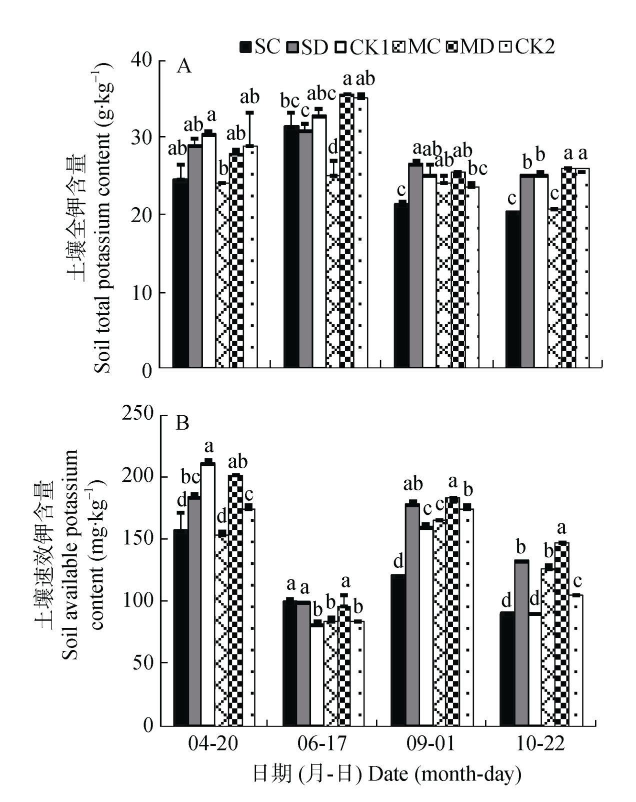


图 4　不同水稻栽培模式下土壤全钾(A)和速效钾(B)含量的动态变化

Fig. 4　Dynamic changes of soil total potassium (A) and available potassium (B) contents under different farming treatments

SC: 水稻同一品种单作常规栽培; SD: 水稻同一品种单作养鸭; CK1: 水稻同一品种单作空白对照(不施肥不养鸭); MC: 水稻两品种混作常规栽培; MD: 水稻两品种混作养鸭; CK2: 水稻两品种混作空白对照(不施肥不养鸭)。图中不同处理间的不同小写字母表示差异显著(P<0.05, LSD 检验)。SC: one rice variety mono-cropping with conventional farming; SD: one rice variety mono-cropping with duck raising farming; CK1: blank control (no fertilization, no duck raising) of one rice variety mono-cropping; MC: two rice varieties mixed cropping with conventional farming; MD: two rice varieties mixed cropping with duck raising; CK2: bland control (no fertilization) of two rice varieties mixed cropping. Different lowercase letters in the figure indicate significant differences (P < 0.05 by LSD test) among treatments.

他处理(水稻混作养鸭处理不显著除外), 但在早稻收获后则以水稻单作养鸭处理的土壤速效钾含量最高; 晚稻收获后, 水稻混作养鸭处理的田间速效钾含量则显著高于其他处理, 其中水稻混作养鸭处理>水稻单作养鸭处理、水稻混作常规种植处理>水稻混作空白对照处理>水稻单作空白对照处理、水稻单作常规种植处理, 且鸭稻共作方式、常规栽培方式、空白种植模式下, 均以混作种植模式较高, 这表明混作种植模式可以更快、更持久地提高和保持田间速效钾含量, 为水稻的生长发育提供可持续的钾元素营养, 若其与鸭稻种植模式套用时则效果更好。

2.2　水稻混作养鸭对稻米品质的影响

从表 1 可以看出, 经过双季稻种植养鸭和水稻混作种植后, 水稻混作养鸭种植模式的糙米率和精米率最高, 且与水稻单作空白对照和水稻单作常规种植相比较, 均达到显著水平, 分别增加 2.03%、1.98%和 6.29%、5.85%; 混作种植模式与单作种植模式的整精米率相比均较高, 尤其水稻混作养鸭种植模式显著高于水稻单作空白对照种植模式; 水稻混作养鸭种植模式下的长宽比与其他各处理(水稻单作空白对照除外)相比均较高; 水稻混作养鸭种植模式与其他所有处理相比, 其稻米垩白粒率最低。水稻混作养鸭的直链淀粉含量和胶稠度与其他种植模式相比均较高, 且显著高于水稻单作养鸭种植模式, 此结果表明水稻混作养鸭种植模式可以改善稻米的蒸煮品质。

3　讨论与结论

水稻混作模式、稻田养鸭模式分别对土壤养分

表 1　不同水稻栽培模式对稻米品质的影响

Table 1　Effect of two rice varieties mix-cropping and duck raising together on the grains quality of rice

处理 Treatment	糙米率 Brown rice rate (%)	精米率 Milled rice rate (%)	整精米率 Whole milled rice rate (%)	长宽比 Lengh/width	垩白粒率 Chalky rate (%)	直链淀粉含量 Amylose content (%)	胶稠度 Gel consistency (cm)
SC	79.51±0.28c	66.48±0.42b	61.52±0.53a	2.86±0.04ab	9.33±1.17d	12.85±1.22b	7.25±0.01f
SD	80.61±0.40ab	67.57±0.70b	62.63±1.12a	2.86±0.02ab	10.00±0.50d	12.83±0.12b	7.57±0.01c
CK1	79.47±0.72c	66.17±1.08b	54.85±0.37b	2.93±0.00a	10.67±0.93cd	13.54±0.68b	7.95±0.01a
MC	80.00±0.08bc	66.69±1.04b	56.24±1.19b	2.81±0.04bc	14.00±1.76bc	17.59±1.75a	7.47±0.03d
MD	81.12±0.05a	70.61±0.80a	60.65±0.04a	2.92±0.06ab	8.17±0.88d	18.47±1.33a	7.63±0.02b
CK2	80.74±0.08ab	66.73±0.10b	59.78±1.10a	2.73±0.03c	16.33±0.67ab	17.70±0.60a	7.31±0.01e

SC: 水稻同一品种单作常规栽培; SD: 水稻同一品种单作养鸭; CK1: 水稻同一品种单作空白对照(不施肥不养鸭); MC: 水稻两品种混作常规栽培; MD: 水稻两品种混作养鸭; CK2: 水稻两品种混作空白对照(不施肥不养鸭)。不同处理间的不同小写字母表示差异显著(P<0.05, LSD 检验)。SC: one rice variety mono-cropping with conventional farming; SD: one rice variety mono-cropping with duck raising farming; CK1: blank control (no fertilization, no duck raising) of one rice variety mono-cropping; MC: two rice varieties mixed cropping with conventional farming; MD: two rice varieties mixed cropping with duck raising; CK2: bland control (no fertilization) of two rice varieties mixed cropping. Different lowercase letters indicate significant differences (P < 0.05 by LSD test) among treatments.

和稻米品质的影响已有很多研究。但水稻混作养鸭复合模式对土壤养分和水稻品质的影响研究尚少见报道。本试验结果发现, 种植双季稻后, 水稻混作养鸭处理的土壤有机质含量显著高于水稻混作常规种植和水稻混作空白对照处理。其原因在于, 鸭粪是一种养分均衡、含量较高的优质有机肥, 据相关研究结果, 鲜鸭粪含有机质含量 255.0 g·kg^{-1}, 全氮含量 16.4 g·kg^{-1}, 全磷含量 15.4 g·kg^{-1}, 全钾含量 8.5 g·kg^{-1}, 一只鸭子日平均产鲜粪 100.0 g[25-26]。同时鸭子的活动促进了稻田水体和土壤与外界的气体交换, 有效增加了土壤氧化还原电位和水体中的溶解氧含量, 促使水稻秸秆粗有机质的转化, 为水稻生长提供了物质基础[27-28]。种植双季稻后混作处理土壤有机质含量显著高于相应的单作处理, 特别地, 当水稻混作与鸭稻共作两模式套用时, 种植一季水稻后土壤有机质含量显著增加。其原因可能是, 在水稻混作养鸭处理中, 水稻分蘖和生物量显著高于其他处理, 结果势必增加该处理下水稻秸秆还田量[29]; 同时, 加上鸭子粪便的输入, 进一步增加了土壤有机质的物质来源, 即水稻混作和鸭稻共作模式套用使得对土壤有机质累积的正向作用相互叠加, 进而导致土壤有机质含量的增高。

对土壤氮素含量而言, 种植双季稻后, 水稻混作常规种植和水稻混作养鸭处理之间的土壤全氮含量差异不显著, 但二者均显著高于其他处理; 同时, 鸭稻共作处理下土壤全氮含量和速效氮含量高于常规栽培方式和空白对照, 其原因是由于鸭子在田间的排泄物可部分补充水稻正常生育所需的氮素[30], 同时鸭子在稻丛间频繁活动, 能疏松表土, 促进土壤有机质的矿化分解和养分释放[31], 促进田间可利用氮素养分的积累。

对土壤磷素含量而言, 晚稻收获后以水稻混作养鸭种植模式的土壤全磷含量最高, 且显著高于水稻单作常规种植处理和水稻混作常规种植处理。同时, 水稻混作种植模式土壤速效磷含量平均水平要高于单作处理。在水稻生长初期需磷量较小, 故而其含量在满足水稻生长外仍有富余, 随着水稻生育期的推进, 因有机肥分解导致剩余量减少, 且在水稻生长的中后期由于水稻的产量形成, 对土壤磷素的需求量增大, 这势必导致土壤有效磷含量下降。各处理间全磷含量差异不大, 但全磷量有所下降。

对土壤钾素含量而言, 种植双季稻后, 各处理间土壤全钾含量差异不显著, 这可能与水稻秸秆还田密切相关。由于水稻生长发育对速效钾养分的吸收, 经种植两季水稻后, 各处理的土壤速效钾含量均有所下降, 但鸭稻共作处理下, 由于鸭子在田间搅动泥水改善土壤通气状况, 加速了钾元素的有效转化[32], 使得土壤速效钾含量仍显著高于其他处理。同时, 混作处理下, 两个水稻品种存在株型差异, 使得水稻群体透气性增强, 也会促进钾素养分的有效化, 故混作处理下土壤速效钾含量也会显著高于两单作处理。同时, 在种植双季稻后, 混作和养鸭种植模式套用时的土壤速效钾含量比水稻混作常规种植和水稻混作空白对照模式高, 这可能是两模式套用对土壤钾素含量正向作用的叠加效应所致, 其相关机制有待于进一步研究。

稻米品质的优劣不仅受遗传因素的影响, 还与水稻生长期间的环境条件[33-34]和栽培技术[35]有密切联系, 品质的形成是品种遗传特性与环境生态条件综合作用的结果[36]。在水稻遗传因素固定的情况下, 稻米品质与水稻生长期间的环境条件和栽培技术密切相关。本研究表明, 鸭稻共作处理有效改良了稻米的加工品质, 且水稻混作养鸭处理的糙米率、精米率和整精米率均较其他处理高, 这与王强盛等[37]研究结果相类似, 其研究认为鸭稻共作是通过鸭的活动及其粪便作为生物有机肥料来源来改善稻米品质。空白对照区仅在生长前期施用了有机肥, 但由于该对照处理未采取任何病虫害防治措施, 田间有害病、虫、草等危害频发, 从而导致稻米品质下降, 如水稻纹枯病、稻飞虱等可使秸秆枯死而导致籽粒结实不饱满, 进而引起稻米品质下降; 水稻混作处理与单作处理相比, 由于两品种的抗性互补作用, 其病虫害发生率有所降低, 因而该处理下稻米品质有所改善, 这与桑海旭等[38]和朱有勇等[39]的研究结果相类似。水稻混作与鸭稻共作两模式套用时, 比其他模式处理的稻米垩白率显著降低, 其原因在于, 鸭稻共作系统中鸭子能清除水稻老叶、枯叶以及菌核菌丝等, 通过促进群体通风透光, 改良土壤通气性能, 改善水稻生长环境从而达到改良稻米品质的效果, 这与王强盛等[37]的研究结果相似。同时, 水稻混作养鸭模式的直链淀粉含量和胶稠度维持在品质较好的范围内, 其原因可能与混作时两水稻品种对养分的吸收较为均衡和互补, 因而有利于该种植模式下稻米品质的改良。

根据上述讨论得知，水稻混作养鸭可以提高田间土壤有机质、全氮和碱解氮的含量，同时提高了稻米的碾磨品质(糙米率和精米率)，改善了稻米的外观品质(垩白率)，且在稻米品质较好的范围内提高了稻米的直链淀粉含量，从而进一步改善了稻米的食味品质。综合而言，水稻混作养鸭可产生较好的生态效应与经济效益(提高稻米品质而增值)，故可开展一定范围的示范与推广应用。

参考文献 References

[1] 程式华，胡培松．中国水稻科技发展战略[J]．中国水稻科学, 2008, 22(3): 223–226
Cheng S H, Hu P S. Development strategy of rice science and technology in China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(3): 223–226

[2] Khush G S. What it will take to feed 5.0 billion rice consumers in 2030[J]. Plant Molecular Biology, 2005, 59(1): 1–6

[3] 周海波，陈巨莲，程登发，等．农田生物多样性对昆虫的生态调控作用[J]．植物保护, 2012, 38(1): 6–10
Zhou H B, Chen J L, Cheng D F, et al. Effects of ecological regulation of biodiversity on insects in agroecosystems[J]. Plant Protection, 2012, 38(1): 6–10

[4] Strand J F. Some agrometeorological aspects of pest and disease management for the 21st century[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(1/2): 73–82

[5] 石梓涵．农业污染现状与影响分析[J]．现代农业科技, 2011(11): 262–263
Shi Z H. Analysis on status and impact of agricultural pollution[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011(11): 262–263

[6] 高东，何霞红，朱有勇．农业生物多样性持续控制有害生物的机理研究进展[J]．植物生态学报, 2010, 34(9): 1107–1116
Gao D, He X H, Zhu Y Y. Review of advances in mechanisms of sustainable management of pests by agro-biodiversity[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(9): 1107–1116

[7] Xi Y G, Qin P. Emergy evaluation of organic rice-duck mutualism system[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(11): 1677–1683

[8] 张帆，陈源泉，高旺盛．“双季稻–鸭”共生生态系统稻季磷循环[J]．生态学杂志, 2012, 31(6): 1383–1389
Zhang F, Chen Y Q, Gao W S. Phosphorus cycling in rice-duck mutual ecosystem in double cropping rice growth seasons[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(6): 1383–1389

[9] 秦钟，章家恩，张锦，等．稻鸭共作系统中主要捕食性天敌的生态位[J]．中国农业科学, 2012, 45(1): 67–76
Qin Z, Zhang J E, Zhang J, et al. Study on ecological niches of main predatory arthropods in integrated rice-duck farming system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(1): 67–76

[10] 沈建凯，黄璜，傅志强，等．规模化稻鸭生态种养对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响[J]．中国生态农业学报, 2010, 18(1): 123−128
Shen J K, Huang H, Fu Z Q, et al. Effect of large-scale rice-duck eco-farming on the composition and diversity of weed community in paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 123−128

[11] 谢俊龙，熊国远．稻鸭共生技术对水体生态环境的影响研究[J]．畜牧与饲料科学, 2010, 31(3): 141–142
Xie J L, Xiong G Y. Effects of rice-duck integrated farming on water ecological environment[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2010, 31(3): 141–142

[12] 黄兆祥，章家恩，梁开明，等．模拟鸭稻共作系统中鸭子机械刺激对水稻形态建成的影响[J]．中国生态农业学报, 2012, 20(6): 717–722
Huang Z X, Zhang J E, Liang K M, et al. Mechanical stimulation of duck on rice phyto-morphology in rice-duck farming system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(6): 717–722

[13] Zhang J E, Ouyang Y, Huang Z X. Characterization of nitrous oxide emission from a rice-duck farming ecosystem in South China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 54(2): 167–172

[14] 袁伟玲，曹凑贵，李成芳，等．稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH_4 和 N_2O 温室效应及经济效益评估[J]．中国农业科学, 2009, 42(6): 2052–2060
Yuan W L, Cao C G, Li C F, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice-fish and rice-duck complex ecosystems and the evaluation of their economic significance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(6): 2052–2060

[15] 全国明，章家恩，杨军，等．稻鸭共作对稻米品质的影响[J]．生态学报, 2008, 28(7): 3475–3483
Quan G M, Zhang J E, Yang J, et al. Impacts of integrated rice-duck farming system on rice quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3475–3483

[16] 李少峰，饶文芳．混植对油菜主要农艺性状及产量的影响[J]．耕作与栽培, 2001(5): 10
Li S F, Rao W F. Effect of mixed planting on the main agronomic traits and yield of oilseed rape[J]. Tillage and Cultivation, 2001(5): 10

[17] Daellenbach G C, Kerridge P C, Wolfe M S, et al. Plant productivity in cassava-based mixed cropping systems in Colombian hillside farms[J]. Agriculture, Ecosystems &

Environment, 2005, 105(4): 595–614
[18] 刘二明, 朱有勇, 肖放华, 等. 水稻品种多样性混栽持续控制稻瘟病研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(2): 164–168
Liu E M, Zhu Y Y, Xiao F H, et al. Using genetic diversity of rice varieties for sustainable control of rice blast disease[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(2): 164–168
[19] 马辉刚, 舒畅, 刘康成, 等. 水稻品种多样性持续控制稻瘟病研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 114–117
Ma H G, Shu C, Liu K C, et al. Studies on rice variety diversity for sustainable control of rice blast[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 114–117
[20] 潘国君, 陈书强, 刘传雪, 等. 品种混植防治寒地稻瘟病流行效果的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 274–276
Pan G J, Chen S Q, Liu C X, et al. Research on mixture inter-planting of different rice varieties to control rice blast in cold region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(4): 274–276
[21] 朱有勇, 孙雁, 王云月, 等. 水稻品种多样性遗传分析与稻瘟病控制[J]. 遗传学报, 2004, 31(7): 707–716
Zhu Y Y, Sun Y, Wang Y Y, et al. Genetic analysis of rice varietal diversity for rice blast control[J]. Acta Genetica Sinica, 2004, 31(7): 707–716
[22] Neugschwandtner R W, Kaul H P. Sowing ratio and N fertilization affect yield and yield components of oat and pea in intercrops[J]. Field Crops Research, 2014, 155: 159–163
[23] 韩豪华, 周勇军, 陈欣, 等. 抗草潜力不同的水稻品种混合种植对稗草的抑制作用[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 319–322
Han H H, Zhou Y J, Chen X, et al. Inhibitory effects of mixed-planting of rice varieties with different weed-tolerant potentials on *Echinochloa crus-galli*[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(3): 319–322
[24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000
[25] 倪文华. 现代化鸭场粪便处理探讨[J]. 中国家禽, 2003, 25(11): 22
Ni W H. The discussion of the excreta disposal on modernism duck farm[J]. China Poultry, 2003, 25(11): 22
[26] 杨志辉, 黄璜, 王华. 稻-鸭复合生态系统稻田土壤质量研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 117–121
Yang Z H, Huang H, Wang H. Paddy soil quality of a wetland rice-duck complex ecosystem[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(2): 117–121
[27] 汪金平, 曹凑贵, 金晖, 等. 稻鸭共生对稻田水生生物群落的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2001–2008
Wang J P, Cao C G, Jin H, et al. Effects of rice-duck farming on aquatic community in rice fields[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(10): 2001–2008
[28] 全国明, 章家恩, 陈瑞, 等. 稻鸭共作对稻田水体环境的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2023–2028
Quan G M, Zhang J E, Chen R, et al. Effects of rice-duck farming on paddy field water environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2023–2028
[29] 章家恩, 许荣宝, 全国明, 等. 鸭稻共作对水稻植株生长性状与产量性状的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1053–1059
Zhang J E, Xu R B, Quan G M, et al. Influence of rice-duck integrated farming on rice growth and yield characteristics[J]. Resources Science, 2011, 33(6): 1053–1059
[30] 章家恩, 陆敬雄, 张光辉, 等. 鸭稻共作生态农业模式的功能与效益分析[J]. 生态科学, 2002, 21(1): 6–10
Zhang J E, Lu J X, Zhang G H, et al. Study on the function and benefit of rice-duck agroecosystem[J]. Ecologic Science, 2002, 21(1): 6–10
[31] 甘德欣, 黄璜. 浅析湖南“稻—草”轮作制的发展前景[J]. 耕作与栽培, 2002(4): 15–17
Gan D X, Huang H. Analysis the development prospect of the rotation system on “rice-grass” in Hunan Province[J]. Tillage and Cultivation, 2002(4): 15–17
[32] 张苗苗, 宗良纲, 谢桐洲. 有机稻鸭共作对土壤养分动态变化和经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 256−260
Zhang M M, Zong L G, Xie T Z. Effect of integrated organic duck-rice farming on the dynamics of soil nutrient and associated economic benefits[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 256−260
[33] 吴自明, 李辉婕, 石庆华, 等. 环境因子和栽培措施对稻米品质影响的研究进展[J]. 农机化研究, 2006(7): 1–4
Wu Z M, Li H J, Shi Q H, et al. Research on the effects of environment factors and cultural methods on rice quality[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(7): 1–4
[34] 游晴如, 黄庭旭, 马宏敏. 环境生态因子对稻米品质影响的研究进展[J]. 江西农业学报, 2006, 18(3): 155–158
You Q R, Huang T X, Ma H M. Advances in effects of environmental ecological factors on rice quality[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2006, 18(3): 155–158
[35] 刘汝敏, 钱富华. 栽培技术对稻米品质的影响及调控措施[J]. 云南农业科技, 2007(4): 33–34
Liu R M, Qian F H. The effect and control measures of cultivation technique on the rice quality[J]. Yunnan Agricultural Science and Technology, 2007(4): 33–34
[36] 杨化龙, 杨泽敏, 卢碧林. 生态环境对稻米品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2001(6): 14–16

Yang H L, Yang Z M, Lu B L. The effect of the ecology environment on rice quality[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2001(6): 14–16
[37] 王强盛, 黄丕生, 甄若宏, 等. 稻鸭共作对稻田营养生态及稻米品质的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 639–645
Wang Q S, Huang P S, Zhen R H, et al. Effect of rice-duck mutualism on nutrition ecology of paddy field and rice quality[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 639–645
[38] 桑海旭, 王井士, 刘郁, 等. 水稻纹枯病对水稻产量及米质的影响[J]. 北方水稻, 2013, 43(1): 10–13
Sang H X, Wang J S, Liu Y, et al. The effect of rice sheath blight on yield and quality[J]. North Rice, 2013, 43(1): 10–13
[39] 朱有勇, 陈海如, 范静华, 等. 利用水稻品种多样性控制稻瘟病研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 521–527
Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, et al. The use of rice variety diversity for rice blast control[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(5): 521–527